

## Propagación de Fisuras subcríticas



Pontificia Universidad Católica del Perú  
Toda la vida adelante.

## Fisuras subcríticas

Son fisuras cuyo tamaño es menor al tamaño crítico que provocaría la fractura del material pero que pueden crecer debido a mecanismos de deterioro del material con el tiempo.

- Fisuras por fatiga
- Fisuras debidas a corrosión bajo tensión
- Fisuras debidas a fragilidad por hidrógeno
- Fisuras por fluencia lenta (creep)



Pontificia Universidad Católica del Perú  
Toda la vida adelante.

## Fisuración por fatiga

La velocidad de crecimiento de la fisura debida a fatiga puede ser calculada cuando esta alcanza un tamaño tal que se puede aplicar la ley de Paris:

$$\frac{da}{dN} = C_o (\Delta K)^n$$

Donde:

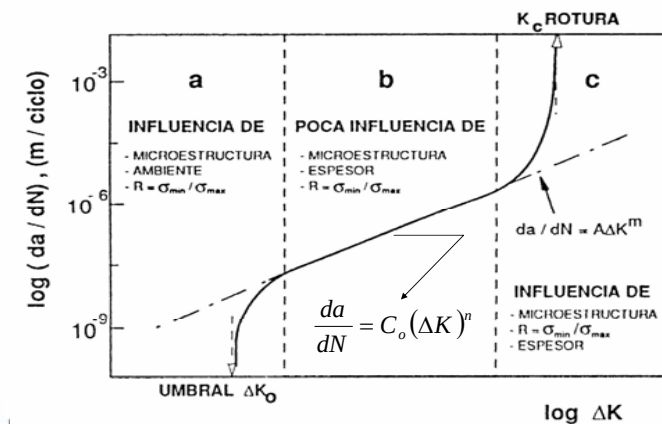
$\Delta K = K_{max} - K_{min}$

$C_o$  y  $n$  dependen del material



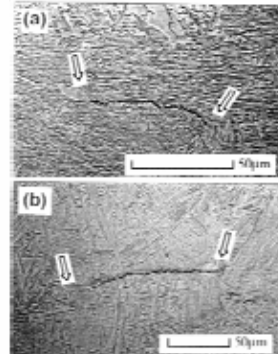
Pontificia Universidad Católica del Perú  
Toda la vida adelante.

## Fisuración por fatiga



Pontificia Universidad Católica del Perú  
Toda la vida adelante.

## Fisuración por fatiga



Mirco Chapetti, 2007

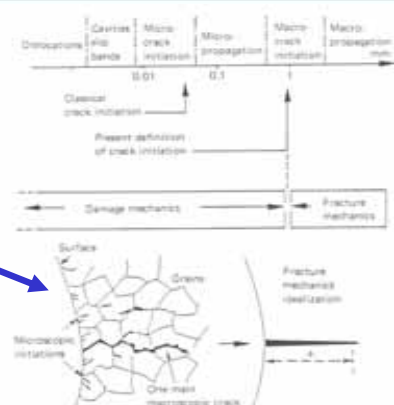


Fig. 1. Schematic illustration of a macroscopic crack initiation concept.

Pontificia Universidad Católica  
Toda la vida adelante.

## Fisuración por fatiga

$$\frac{da}{dN} = C_o (\Delta K)^n$$

Teniendo en cuenta que:  $\Delta K = Y(\Delta\sigma)\sqrt{\pi.a}$

$$\frac{da}{dN} = C_o \left( Y(\Delta\sigma)\sqrt{\pi.a} \right)^n$$

$$dN = \frac{da}{C_o \left( Y(\Delta\sigma)\sqrt{\pi.a} \right)^n}$$

Pontificia Universidad Católica del Perú  
Toda la vida adelante.

## Fisuración por fatiga

Integrando la ecuación anterior :

$$\int dN = \int_{a_0}^{a_c} \frac{da}{C_o \left( Y(\Delta\sigma)\sqrt{\pi.a} \right)^n}$$

tamaño de fisura crítica

tamaño de fisura inicial

$$Nf = \frac{(1/a_0)^{(n/2)-1} - (1/a_c)^{(n/2)-1}}{(n/2-1)Y^n \pi^{n/2} C_o (\Delta\sigma)^n}$$

Tiempo de vida en fatiga

Pontificia Universidad Católica del Perú  
Toda la vida adelante.

## Fisuración por fatiga

$a_c$  se calcula empleando el criterio de falla por fractura:

$$K = K_{IC}$$

$$K = Y \cdot \sigma \cdot \sqrt{\pi.a}$$

$$a_c = 1/\pi \left( \frac{K_{IC}}{Y \cdot \sigma} \right)^2$$

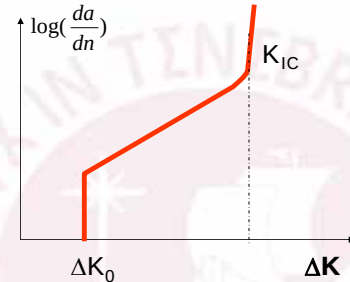
$\sigma$  es el valor máximo de esfuerzos actuante en el componente

Pontificia Universidad Católica del Perú  
Toda la vida adelante.

## Fisuración por fatiga

$\Delta K_0$  es una función de:

- $\sigma_{min}/\sigma_{max}$ ,
- microestructura
- medio que rodea a la fisura



Para aceros:

$$\Delta K_0 = 7(1-0,85R) \dots \dots 0,1 < R < 0,9$$

$$\Delta K_0 = 5 - 6 \dots \dots R < 0,1$$

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}$$



Pontificia Universidad Católica del Perú

Toda la vida adelante.

Valores de  $C_0$  y  $n$  cuando  $da/dN$  (mm/ciclo) y  $\Delta K$  (MPa $\sqrt{m}$ )

| MATERIALES                       | $C_0$                | $n$ |
|----------------------------------|----------------------|-----|
| • Aluminio (comercialmente puro) | $45 \times 10^{-9}$  | 2,9 |
| • Aleación Al/4,5%Cu             | $39 \times 10^{-9}$  | 3,7 |
| • Aleación Al/5%Mg               | $281 \times 10^{-9}$ | 2,7 |
| • Aleación Al/5,5%Zn             | $126 \times 10^{-9}$ | 3,7 |
| • Cobre                          | $3 \times 10^{-9}$   | 3,7 |
| • Acero suave                    | $4 \times 10^{-9}$   | 3,0 |
| • Acero ferrítico perlítico      | $7 \times 10^{-9}$   | 3,0 |
| • Acero austenítico 18/8         |                      |     |
| • Acero (barra corrugada)        | $3 \times 10^{-9}$   | 3,1 |
| • Acero (alambre pretensado)     | $11 \times 10^{-9}$  | 2,4 |
| • Titanio                        | $7 \times 10^{-9}$   | 4,4 |
| • Polimetacrilato                | $230 \times 10^{-4}$ | 4,7 |
| • Policarbonato                  | $1 \times 10^{-4}$   | 2,6 |
| • Granito                        | $2 \times 10^{-4}$   | 12  |

Departamento de Ciencia de los materiales ETSI caminos UPM

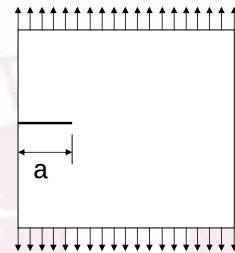


Pontificia Universidad Católica del Perú

Toda la vida adelante.

## Ejemplo:

Una estructura de acero ferrítico perlítico presenta una fisura pasante en su esquina de  $a = 0,5$  mm de profundidad. Los esfuerzos a los cuales esta sometido varían de 0 a 180 MPa ( $f=5$  ciclos/min), siendo la tenacidad de fractura del material ( $K_{IC}$ ) : 50MPa $\sqrt{m}$ .



$$K = 1,12\sigma \sqrt{\pi a}$$

¿Cual será el tiempo de vida en fatiga del componente en servicio?



Pontificia Universidad Católica del Perú

Toda la vida adelante.

## Ejemplo:

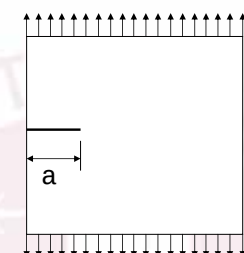
Teniendo en cuenta el tipo de acero, se puede asumir que:

$$\frac{da}{dN} (\text{mm / ciclo}) = 7 \times 10^{-9} (\Delta K)^3$$

$$\text{Donde: } \Delta K = 1,12(\Delta \sigma) \sqrt{\pi a}$$

$$\Delta K = 1,12(180) \sqrt{\pi \cdot 5 \times 10^{-4}} = 8 \text{ MPa} \sqrt{m}$$

Verificaremos ahora si  $\Delta K > \Delta K_0$



Pontificia Universidad Católica del Perú

Toda la vida adelante.

**Ejemplo:**

Teniendo en cuenta que  $R = \sigma_{\min}/\sigma_{\max} = 0$

Para aceros:

$$\Delta K_0 = 7(1-0,85R) \dots \dots 0,1 < R < 0,9$$

$$\Delta K_0 = 5 - 6 \dots \dots 0,0 < R < 0,1$$

entonces  $\Delta K_0 = 5$

Como  $\Delta K = 8 > 5 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ , entonces la fisura se propagará por fatiga.



Pontificia Universidad Católica del Perú  
Toda la vida adelante.

**Ejemplo:**

Ahora calcularemos " $a_c$ "

$$a_c = 1/\pi \left( \frac{K_{IC}}{Y \cdot \sigma} \right)^2$$

$$a_c = 1/\pi \left( \frac{50}{1,12 \times 180} \right)^2 = 0,02 \text{ m}$$

La estructura se fracturará cuando la fisura haya alcanzado un tamaño de  $a_c = 20 \text{ mm}$



Pontificia Universidad Católica del Perú  
Toda la vida adelante.

**Ejemplo:**

Aplicando la fórmula:

$$Nf = \frac{(1/a_0)^{(n/2)-1} - (1/a_c)^{(n/2)-1}}{(n/2-1)Y^n \pi^{n/2} C_0 (\Delta \sigma)^n}$$

$$Nf = \frac{(1/0,0005)^{(3/2)-1} - (1/0,020)^{(3/2)-1}}{(0,5)1,12^3 \pi^{3/2} 7 \times 10^{-12} (180)^3}$$

$$Nf = \frac{44 - 7}{0,000159} = 235305 \text{ ciclos}$$



Pontificia Universidad Católica del Perú  
Toda la vida adelante.

**Ejemplo:**

Teniendo en cuenta que la frecuencia de la carga cíclica es de 5 ciclos/min, entonces:

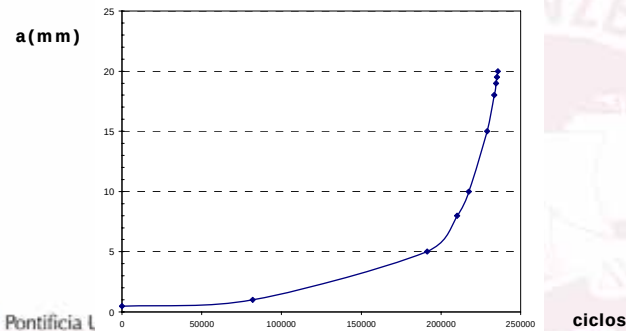
tiempo de vida residual =  $235305/5 = 47060 \text{ min}$  (784 horas).



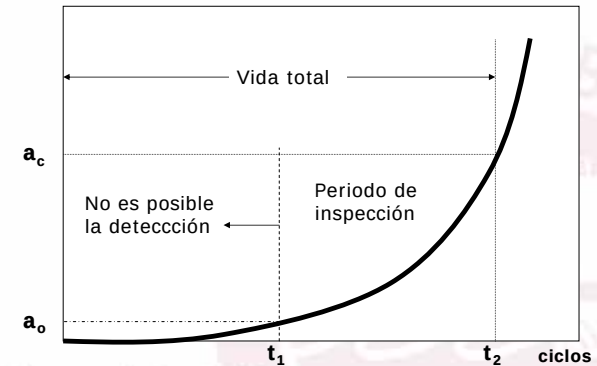
Pontificia Universidad Católica del Perú  
Toda la vida adelante.

**Ejemplo:**

Teniendo en cuenta el problema anterior se pide graficar como va creciendo el tamaño de fisura en el tiempo.



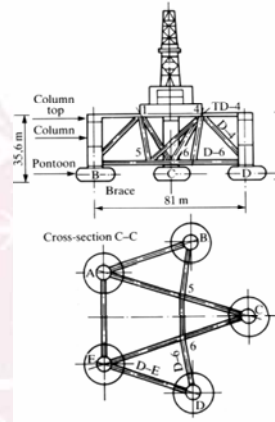
Pontificia Universidad Católica del Perú  
Toda la vida adelante.

**Análisis de tolerancia al daño**

Pontificia Universidad Católica del Perú  
Toda la vida adelante.

**La catástrofe de la plataforma petrolera "Alexander Kielland" (1980)**

El Alexander L Kielland era una plataforma móvil semisubmersible del tipo de Pentagono, un diseño que había sido desarrollado en Francia. El aparejo fue construido entre 1973 y 1976 en Francia para un operador americano. Aunque fue diseñado como una plataforma de perforación, él funcionó solamente como plataforma hospedaje durante sus cuatro años en servicio.



Pontificia Universidad Católica del Perú  
Toda la vida adelante.

**La catástrofe de la plataforma petrolera "Alexander Kielland" (1980)**

En la tarde del 27 de marzo 1980 una de las cinco columnas de la plataforma se rompió mientras esta estaba asegurada en el Mar del Norte. La plataforma se inclinó inmediatamente a un ángulo de 30-35° hasta volcarse 20 minutos después. De los siete botes salvavidas a bordo, solamente dos fueron lanzados con éxito debido a las malas condiciones atmosféricas. De los 212 hombres a bordo la plataforma, 123 murieron.

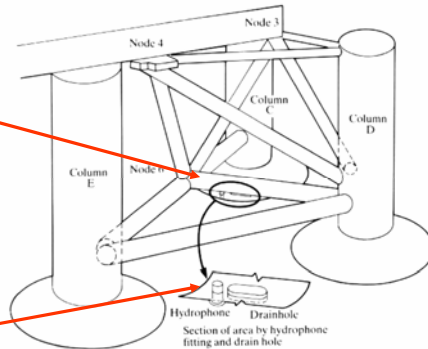


Pontificia Universidad Católica del Perú  
Toda la vida adelante.

### La catástrofe de la plataforma petrolera "Alexander Kielland" (1980)

La falla se produjo por fatiga en el parante D6

a partir de grietas pre-existentes en la soldadura de filete que unía el soporte del hidrófono con el parante

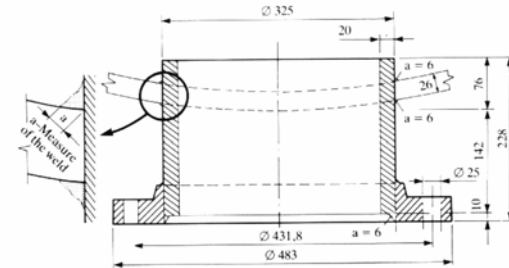


Pontificia Universidad Católica del Perú

Toda la vida adelante.

### La catástrofe de la plataforma petrolera "Alexander Kielland" (1980)

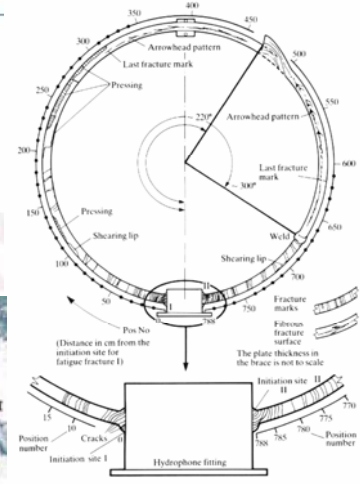
El soporte del hidrófono fue unido al parante D6 mediante soldadura por filete.



Pontificia Universidad Católica del Perú

Toda la vida adelante.

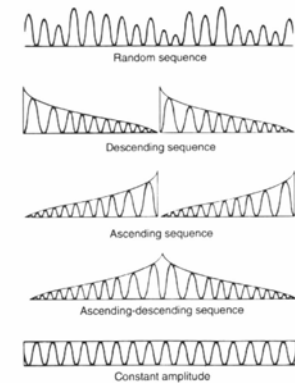
La fisura por fatiga se propagó los 2/3 de toda la circunferencia del parante antes de provocar la fractura final..



Toda la vida adelante.

### Efecto del tipo de carga cíclica sobre la velocidad de propagación de la grieta

En algunos materiales como el aluminio el tipo de carga cíclica influye de manera notable en la vida en fatiga de un componente.



Cargas de amplitud variable o sobrecargas periódicas pueden provocar plastificación local en el vertice de la grieta que genere tensiones residuales

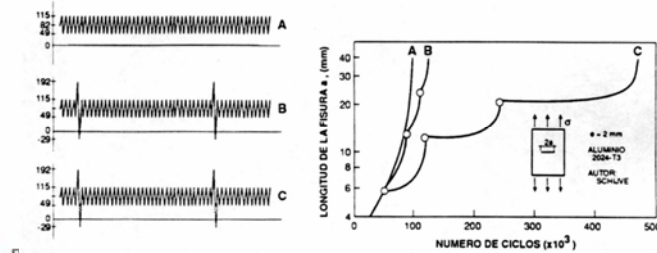


Pontificia Universidad Católica del Perú

Toda la vida adelante.

### Efecto del tipo de carga cíclica sobre la velocidad de propagación de la grieta

Cuando se aplica una sobrecarga periódica es posible generar tensiones residuales de compresión en el vértice de la fisura con lo cual se incrementa el tiempo de vida en fatiga del componente.



Toda la vida adelante.

### La catástrofe de los aviones "Comet"

En los años 50, apreciaron los primeros turbo-jets comerciales. Éstos, eran fabricados por BOAC, quienes los denominaron "De Havilland Comet".

Después de un año de vuelos los Comet comienzan a tener problemas. El primero de ellos fue en mayo de 1953.



Sin embargo, ocurrieron varios accidentes más, inclusive algunos explotaron en pleno vuelo, y pasado esto, todos los aviones Comet fueron sacados de servicio.



Pontificia Universidad Católica del Perú  
Toda la vida adelante.

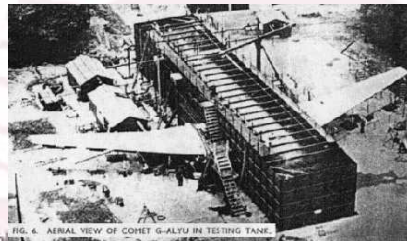
La presión de estos aviones era 50% mayor que cualquier otra aeronave contemporánea

### La catástrofe de los aviones "Comet"

Se realizaron una serie de ensayos a escala 1 en 1 en un avión Comet. Para ello, se realizó la construcción de un tanque en Farnborough en que cubriría todo el fuselaje.

Los Comet mantenían la presión dentro del fuselaje mediante un sistema "high pressure".

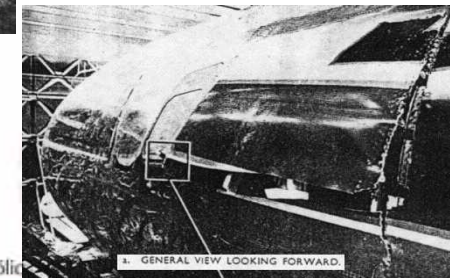
Bajo esta premisa, se colocó al Comet G-ALYU que ya había trabajado dentro del tanque construido y se llenó a este con una gran cantidad de agua que transmitiría la presión en ciclos.



Pontificia Universidad Católica del Perú  
Toda la vida adelante.



Terminados los ensayos, se procedió a analizar el tipo de fallas que se habían originado. Se observaron enormes grietas en los vértices de las vetanas cuadradas originadas por la falla catastrófica fatiga.



Pontificia Universidad Católica del Perú  
Toda la vida adelante.

Terminados los ensayos, se procedió a analizar el tipo de fallas que se habían originado. Se observaron enormes grietas en los vértices de las vetanas cuadradas originadas por la falla catastrófica fatiga.

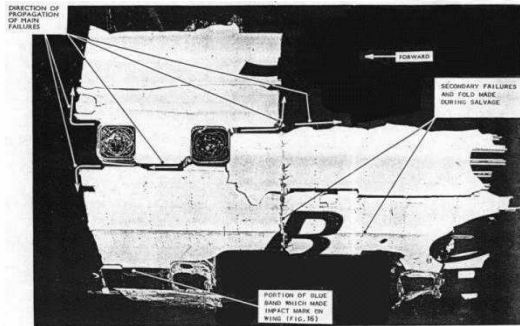


FIG. 12. PHOTOGRAPH OF WRECKAGE AROUND ADF AERIAL WINDOWS—GALP.

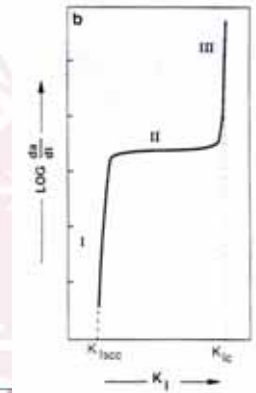


Toda la vida adelante.

### Fisuración por Corrosión bajo tensión

La propagación de la fisura debida a CBT presenta tres etapas:

- I. Depende fuertemente de  $K_I$
- II. Dominada por el proceso electroquímico de fragilización y no por el estado tensional
- III. Depende de  $K_I$  y es la etapa de inestabilidad del componente



Pontificia Universidad Católica del Perú

Toda la vida adelante.

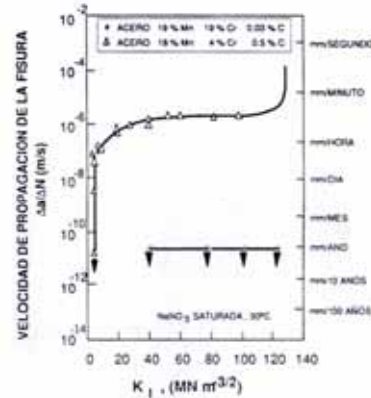
### Fisuración por Corrosión bajo tensión

En la segunda región (II) se cumple que:

$$\frac{da}{dt} = K$$

Para determinar el valor de  $K_{SCC}$  se suele considerar una velocidad

$$\frac{da}{dt} \approx 1 \text{ mm / año}$$

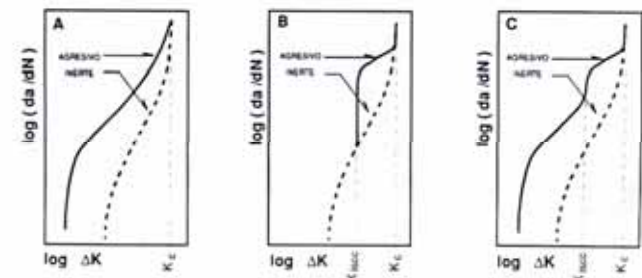


Pontificia Universidad Católica del

Toda la vida adelante.

### Fisuración por Corrosión-Fatiga

Acción combinada de una tensión cíclica y de un medio ambiente agresivo. La corrosión fatiga reduce enormemente la vida en servicio de un componente.

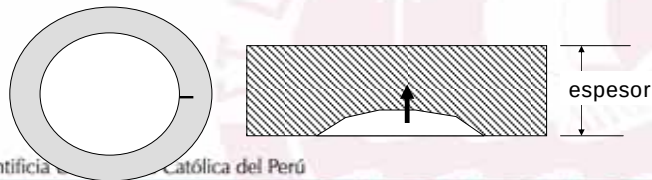


Pontificia Universidad Católica del Perú

Toda la vida adelante.

**Leak-Before-Break (LBB)**

El concepto de LBB consiste en que todas las fisuras o defectos que se desarrollan en un componente crecerán hasta ser pasantes y poder ser detectables por sistemas de monitoreo en planta (pruebas de fugas) sin que fracturen.



Pontificia Universidad Católica del Perú  
Toda la vida adelante.

**Leak-Before-Break (LBB)**

- Calcular el tamaño crítico de fisura pasante para varios puntos del recipiente o tubería en la condición de "fuga".  
Teniendo en cuenta : presión, esfuerzos térmicos, peso muerto, carga sísmica
- Calcular los esfuerzos críticos para el tamaño de fisura pasante en la condición de "fuga".
- Asegurar que la fuga a través de la fisura crítica pasante pueda ser detectada por sistemas para prueba de fuga.
- Realizar una evaluación de crecimiento de grieta por fatiga para demostrar que la fisura pasante será aceptable ( código ASME secc. XI ) y no crecerá significativamente durante el servicio.



Pontificia Universidad Católica del Perú  
Toda la vida adelante.